

Systèmes de référence en pratique

Systèmes géodésiques de référence et
transformations de coordonnées pour l'utilisateur du GPS

Urs Marti
Dieter Egger

Août 1999



Systèmes de référence en pratique

Systèmes géodésiques de référence et transformations de coordonnées pour l'utilisateur du GPS

Urs Marti
Dieter Egger

Table des matières :

1	Introduction.....	1
2	Notions de base – fondements géodésiques.....	1
2.1	Le système géodésique de référence.....	1
2.2	Systèmes altimétriques.....	3
2.3	Projections cartographiques.....	4
3	Systèmes et cadres de référence actuels.....	6
3.1	Systèmes de référence dynamiques globaux.....	6
3.2	Systèmes de référence statiques locaux.....	8
4	Transformations de coordonnées entre cadres de référence.....	11
4.1	Principales méthodes de changement de datum.....	11
4.2	Transformations entre cadres de référence globaux.....	13
4.3	Transformations entre cadres de références locaux (MN03 $\Leftrightarrow$ MN95).....	13
4.4	Transformations entre cadres de référence locaux et globaux.....	13
5	Sources et références bibliographiques complémentaires.....	21
6	Abréviations utilisées.....	22

Annexes :

- A Paramètres d'ellipsoïdes et paramètres de transformation**
- B Conversions entre systèmes de coordonnées**
- C Formules de la projection suisse**
- D Solutions approchées pour le passage CH1903 $\Leftrightarrow$ WGS84**
- E Représentation graphique des différences entre CH1903 et WGS84**
- F Exemples numériques**



1 Introduction

Autrefois, la question du système géodésique de référence à utiliser n'intéressait pratiquement que les spécialistes en charge de la mensuration primordiale d'un pays. Le professionnel suisse de la mensuration, simple utilisateur des réseaux de base mis à sa disposition par la mensuration nationale, n'avait pas à se soucier de ce type de considérations puisqu'il effectuait tous ses calculs dans un système de référence unique, celui des coordonnées nationales suisses. Toutefois, cette situation s'est radicalement modifiée avec l'apparition puis la généralisation de l'utilisation du GPS en mensuration. En effet, ce système permet la détermination de positions à partir d'orbites connues de satellites, lesquelles sont à leur tour définies dans un système de référence qui leur est propre. Ainsi, plus aucun utilisateur du GPS ne peut s'épargner l'étude des différents systèmes géodésiques de référence auxquels il sera confronté, au plus tard, lors de la transformation usuelle des résultats GPS dans le système de référence traditionnel. En Suisse, ce sujet est d'autant plus d'actualité que de nouveaux systèmes de référence ont été introduits dans le cadre de la nouvelle mensuration nationale MN95.

Le présent rapport a pour objet de donner au lecteur un aperçu des systèmes géodésiques de référence d'usage courant et pouvant présenter un intérêt en Suisse pour un utilisateur civil ou militaire. Après une introduction rappelant les fondements géodésiques indispensables à l'exposé, on s'attachera à décrire les différents systèmes géodésiques de référence et à présenter diverses voies possibles pour la transformation des coordonnées. Formules, paramètres et exemples de calcul sont rassemblés dans les annexes.

Il existe suffisamment de publications consacrées à cette question et explorant tous ces aspects dans les moindres détails. En conséquence, il ne s'agit pas ici de se montrer exhaustif ou de respecter l'exactitude scientifique la plus scrupuleuse, mais de privilégier la clarté du propos dans l'optique d'une utilisation concrète des solutions présentées. Ainsi, des inexactitudes ont parfois été acceptées à condition toutefois qu'elles restent sans influence pour le praticien et qu'elles facilitent la compréhension du problème.

2 Notions de base – fondements géodésiques

2.1 Le système géodésique de référence

Les coordonnées géodésiques servent habituellement à décrire la position de points à la surface terrestre. Le géoïde défini de manière physique (surface en laquelle le potentiel est nul, assimilable au niveau moyen des mers prolongé sous les continents) se révélant être une surface de référence inadaptée du fait de la complexité de sa forme (tout au moins en ce qui concerne la planimétrie), on recourt à un ellipsoïde de révolution pour jouer le rôle de modèle approché et on décrit la position d'un point par des coordonnées ellipsoïdiques (longitude, latitude, altitude) rapportées à cet ellipsoïde dit de référence. Ces coordonnées ellipsoïdiques sont généralement transformées dans un système de projection plan (plan cartographique, pour les coordonnées nationales par exemple) afin d'en rendre l'utilisation plus aisée. Les coordonnées en projection dépendent toutefois du système de référence qui les sous-tend et se modifient avec ce dernier.

La description d'un système géodésique de référence (également désigné par l'expression de "datum géodésique") apporte avant tout des réponses aux questions suivantes :

- quelles sont les dimensions et la forme de l'ellipsoïde de référence utilisé ?
- où et comment est positionné l'ellipsoïde de référence, resp. le système géocentrique de coordonnées cartésiennes dont l'origine coïncide avec le centre de l'ellipsoïde (par rapport à un autre système de référence, dont l'origine est par exemple le centre de gravité des masses terrestres) ?

Il ressort de la Fig. 2.1-1 que les coordonnées ellipsoïdiques (longitude L , latitude B , altitude H) de même que les valeurs associées de la cote du géoïde (cf. § 2.2) et des composantes de la déviation de la verticale du point P changent lorsqu'on modifie la forme de l'ellipsoïde de référence, qu'on le fait pivoter ou qu'on lui fait subir une translation. En conséquence, les coordonnées d'un même point peuvent varier de plusieurs centaines de mètres entre deux systèmes de référence différents.

La forme et les dimensions de l'ellipsoïde de référence sont définies par deux paramètres, par exemple par la longueur des deux demi-axes a et b (cf. annexe A).

Si l'on suppose que l'ellipsoïde de référence et le système géocentrique de coordonnées cartésiennes X , Y , Z ayant le centre de gravité des masses terrestres pour origine (cf. Fig. 2.1-1) possèdent la même échelle et que leurs axes sont parallèles, alors la position de l'ellipsoïde de référence dans l'espace peut être décrite par l'intermédiaire de trois paramètres. La solution la plus simple et la plus claire consiste à indiquer les

différences de coordonnées ΔX , ΔY , ΔZ entre l'origine de l'ellipsoïde de référence et le centre de gravité des masses terrestres. Cette méthode n'était autrefois pas courante pour des raisons historiques, c'est pourquoi on fixait à la place trois valeurs par rapport à un point dit fondamental d'une mensuration nationale, par exemple les coordonnées ellipsoïdiques (L, B, H) de ce point ou les composantes de la déviation de la verticale et la cote du géoïde en ce point.

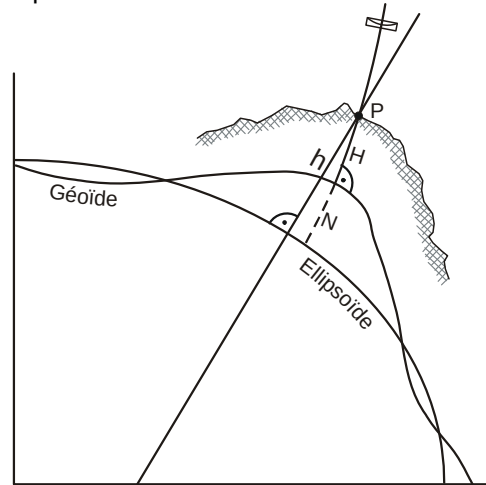


Fig. 2.1-1 : Forme et position de l'ellipsoïde de référence [Elmiger et al. 1997]

Les problèmes relatifs aux dimensions, à la forme et à la position de l'ellipsoïde de référence ont été résolus de diverses manières selon les pays concernés, pour des raisons tant historiques que pratiques. Généralement, l'ellipsoïde de référence était choisi de telle façon qu'il s'adapte au mieux aux conditions locales du géoïde, sans avoir à tenir compte de la situation propre aux autres pays. Ainsi sont nés des **systèmes de référence locaux** ou localement positionnés, spécifiques à la **mensuration nationale** de chaque pays.

Les systèmes de référence locaux sont à distinguer des **systèmes de référence globaux**, ces derniers n'ayant fait leur apparition que dans les années soixante avec l'avènement de la géodésie par satellites. Les avantages qu'ils présentent par rapport aux systèmes de référence locaux ou nationaux sont manifestes dans le cas principalement de projets transfrontaliers ou internationaux, raison pour laquelle le **GPS** utilise un système de référence global.

Tous les systèmes de référence globaux décrits dans la suite sont définis comme des "systèmes terrestres conventionnels (Conventional Terrestrial Systems, CTS)". Leur origine se trouve au centre de gravité des masses terrestres, leur axe Z passe par le pôle Nord (ou plus précisément par l'origine internationale conventionnelle, Conventional International Origin ou CIO), le plan XZ contient l'origine moyenne à l'observatoire de Greenwich et l'axe Y complète l'ensemble de façon à former un système d'axes cartésien direct (cf. Fig. 2.1-2).

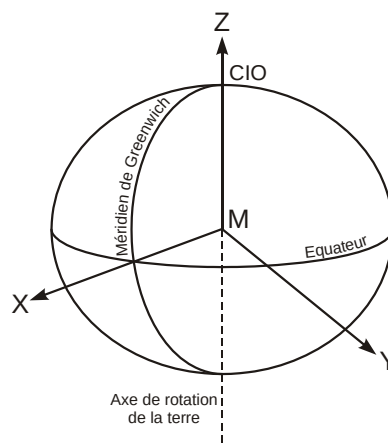


Fig. 2.1-2 : Système terrestre conventionnel (Conventional Terrestrial System, CTS) [Scherrer]

Comme les systèmes de référence locaux, les systèmes de référence globaux peuvent utiliser différents ellipsoïdes de référence, leurs origines devant coïncider avec le centre de gravité des masses terrestres. Les dimensions et la forme de l'ellipsoïde sont alors choisies de telle manière qu'il s'adapte au mieux au géoïde à l'échelle du globe (cf. Fig. 2.1-3). Les cotes du géoïde sont par conséquent assez élevées en Suisse (de l'ordre de 50 mètres) en cas d'utilisation d'un système de référence global (par exemple ETRS89) alors qu'elles restent faibles (inférieures à 5 mètres) dans le système de référence local suisse CH1903 (cf. Fig. 2.1-4).

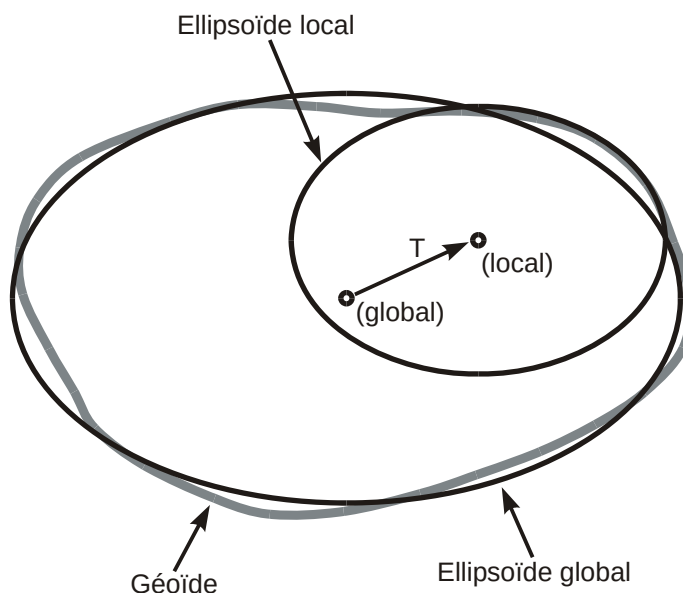


Fig. 2.1-3 : Ellipsoïdes de référence (global et local)

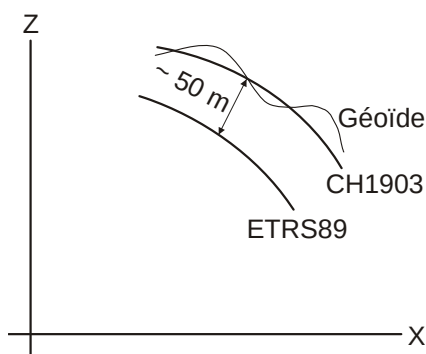


Fig. 2.1-4 : Vue en coupe des ellipsoïdes [d'après : Elmiger et al. 1997]

2.2 Systèmes altimétriques

L'altimétrie et la planimétrie sont séparées aussi bien pour les coordonnées ellipsoïdiques que pour les coordonnées en projection, au contraire des coordonnées géocentriques cartésiennes tridimensionnelles. On distingue ainsi différentes altitudes pour un seul et même point en fonction de la référence choisie.

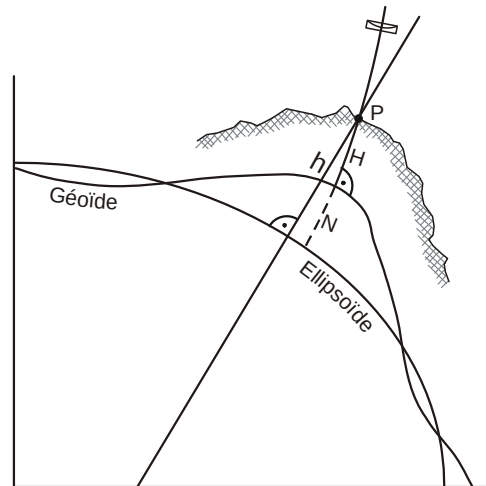


Fig. 2.2-1 : Les différentes altitudes [Scherrer]

L'**altitude ellipsoïdique h** se rapporte à l'ellipsoïde de référence. Elle désigne la distance séparant le point P de l'ellipsoïde et est mesurée le long de la normale à l'ellipsoïde.

L'**altitude orthométrique H** se rapporte en revanche au géοïde. Elle désigne la distance séparant le point P du géοïde et est mesurée le long de la verticale.

Les **altitudes usuelles** suisses se rapportent également au géοïde. Elles ne sont toutefois équivalentes aux altitudes orthométriques que de manière approchée car elles ont d'une part été calculées sans que des mesures gravimétriques soient prises en compte et reposent d'autre part sur des altitudes déterminées par nivellement au siècle dernier, données auxquelles aucune correction n'a été appliquée pour tenir compte du soulèvement alpin intervenu depuis lors.

Les **altitudes normales** ne sont mentionnées ici que dans un souci d'exhaustivité. Elles se rapportent au quasi-géοïde. Le réseau altimétrique européen se basant sur des altitudes normales, celles-ci sont également importantes en Suisse pour l'échange de données avec l'étranger. Le lecteur se reportera par exemple à [Wirth 1990] ou [Kahle 1988] pour obtenir des informations détaillées au sujet des altitudes normales et du quasi-géοïde.

L'angle que forment la direction du fil à plomb (la verticale) et la normale à l'ellipsoïde correspond à la déviation de la verticale. L'écart séparant l'altitude ellipsoïdique de l'altitude orthométrique est égal à l'ondulation du géοïde (également appelée cote du géοïde), soit $N = h - H$. L'importance que revêt cette relation pour l'utilisateur du GPS devient évidente lorsqu'on sait que ce système fournit des altitudes ellipsoïdiques tandis que l'ancien nivellement fédéral suisse (LN02) utilise des altitudes usuelles et que le nouveau réseau national altimétrique (RNA95) emploie des altitudes orthométriques.

2.3 Projections cartographiques

La projection **UTM (Universal Transverse Mercator)** a été introduite en 1947 par l'U.S. Army pour l'établissement de cartes militaires à grande échelle et son usage s'est rapidement répandu en raison de sa définition s'appliquant à toute la planète, à l'exception toutefois des zones polaires. La projection cartographique UTM procède à la subdivision de la surface terrestre en fuseaux (appelés zones) de 6° de longitude chacun. Tous sont projetés sur un cylindre enveloppant la Terre (cf. Fig. 2.3-1), le méridien central de la zone formant la ligne de contact entre les deux surfaces pour chacune de ces projections. Le cylindre est ensuite développé. L'origine des coordonnées UTM d'une zone est en principe définie par l'intersection du méridien central et de l'équateur, une constante de 500'000 m (faux est ou false easting) étant ajoutée aux coordonnées est dans l'hémisphère nord. L'échelle est réduite sur le méridien central de manière à limiter les déformations inhérentes à la projection, lesquelles croissent à mesure que l'on s'approche de la bordure de la zone. Le lecteur se reportera à [Schödlbauer 1992] pour obtenir des indications détaillées, un formulaire et des exemples de calcul relatifs à la projection UTM.

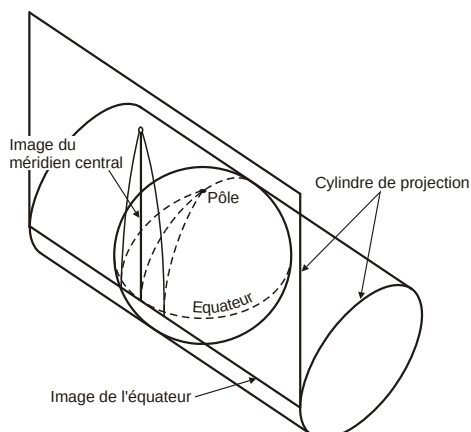


Fig. 2.3-1 : Projection UTM (Universal Transverse Mercator) [Schödlbauer 1992]

Depuis 1903, une **projection cylindrique conforme à axe oblique (projection de Mercator)** (sur l'ellipsoïde de Bessel) est utilisée pour la **projection cartographique suisse** [Rosenmund 1903]. Le cylindre sur lequel s'effectue la projection est incliné de telle manière par rapport à l'axe des pôles, que le cercle de tangence en direction est - ouest (direction d'extension maximale du pays), sur lequel les distances sont conservées, passe par le point fondamental se trouvant à Berne (cf. Fig. 2.3-2). Les distances par rapport au cercle de tangence – et par suite les déformations dues à la projection – peuvent de la sorte être limitées. Le fait que l'axe soit oblique implique toutefois que la projection doit être réalisée en trois étapes successives (contre deux dans le cas de la projection UTM) :

1. Projection conforme de l'ellipsoïde sur la sphère selon Gauss
2. Transformation (torsion) du système équatorial en un système dit pseudo-équatorial
3. Projection conforme de Mercator avec le pseudo-équateur comme cercle de tangence

Les formules de la projection suisse figurent en annexe C.

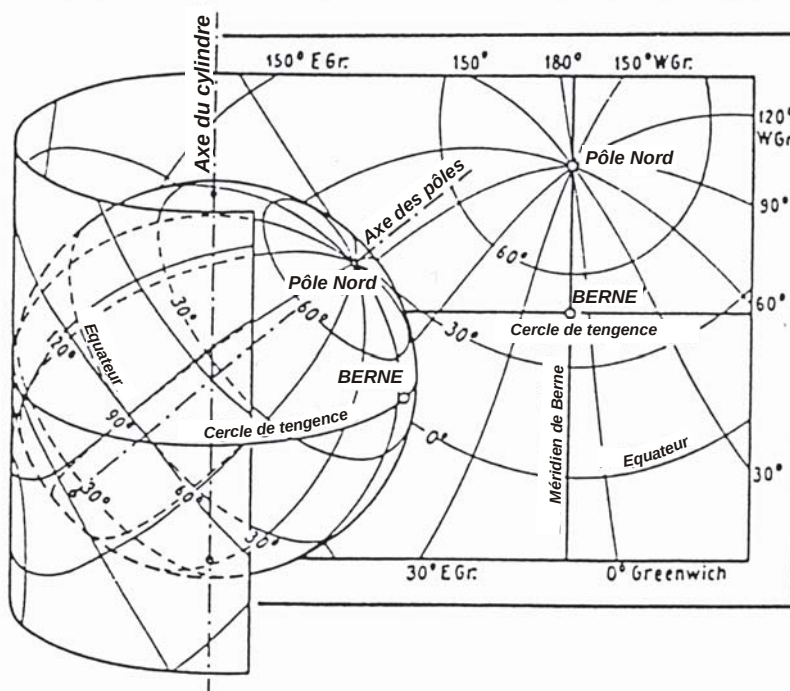


Fig. 2.3-2 : Projection cartographique suisse (avec pseudo-équateur passant par Berne) [Bolliger 1967]



3 Systèmes et cadres de référence actuels

Il est nécessaire d'établir une distinction entre les notions (très proches) de "système de référence" et de "cadre de référence" pour restaurer une certaine clarté car la multiplicité des désignations aujourd'hui usuelles dans le domaine des systèmes de référence est source de confusion. La notion de **système de référence** (Reference System) désigne la définition théorique d'un système de coordonnées dans l'espace. Par **cadre de référence** (Reference Frame) associé, on entend la réalisation de ce système sous forme de séries de coordonnées (et éventuellement de séries de vitesses) de points réels. Ces séries de coordonnées résultent de la compensation d'observations géodésiques, ce qui signifie du même coup qu'un nouveau cadre de référence est réalisé à chaque nouvelle détermination des séries de coordonnées.

3.1 Systèmes de référence dynamiques globaux

Au contraire des systèmes de référence statiques (tels CH1903+, cf. § 3.2), les systèmes de référence dynamiques et leurs cadres de référence associés tiennent compte des déplacements de points intervenus au cours du temps. Cet état de fait peut être directement et clairement mis en lumière en exposant les liens unissant les systèmes ITRS, ETRS89 et CHTRS95.

Les déplacements d'un point solidement implanté dans le rocher dans les Alpes valaisannes (les glissements de terrain et autres phénomènes de même nature étant donc exclus ici) peuvent s'expliquer par des causes différentes hiérarchiquement liées entre elles: au niveau le plus élevé, on trouve le mouvement global de l'ensemble de la croûte terrestre de façon quasiment "relative aux étoiles fixes" (paramètres de rotation de la Terre); au niveau intercontinental, figure le mouvement de l'Europe (ou plus exactement de la plaque eurasiatique) par rapport aux autres plaques tectoniques; au niveau continental, on enregistre les mouvements de la Suisse par rapport à l'Europe et enfin au niveau national on trouve le mouvement des Alpes valaisannes par rapport au point fondamental de Zimmerwald qui se trouve sur le Plateau. Les systèmes de référence dynamiques ont été définis sur le modèle de cette hiérarchie des mouvements: l'ITRS au niveau mondial, l'ETRS89 pour l'Europe et le CHTRS95 pour la Suisse (cf. Fig. 3.1-1).

La raison pratique de ce choix apparaît clairement dans l'exemple de l'ETRS89. Du fait du mouvement tectonique de la plaque eurasiatique dans le système de référence global (en direction du nord-est), des modifications (toutes orientées dans le même sens) de l'ordre de 3 cm par an sont apportées dans l'ITRS à toutes les coordonnées des stations implantées en Europe du Nord et en Europe centrale. Comme des coordonnées variant fortement au cours du temps sont totalement inadaptées à une utilisation pratique en mensuration, un système de référence européen a été défini, baptisé ETRS89, se déplaçant avec la plaque eurasiatique par rapport à l'ITRS. Ainsi, les coordonnées des stations dans le système ETRS89 ne se modifient-elles donc plus au cours du temps qu'en raison des phénomènes tectoniques internes à la plaque eurasiatique, c.-à-d. de manière peu significative.

Les systèmes de référence dynamiques sont dynamiques à deux titres différents. D'une part, un système de référence entier (donc son origine, pour ainsi dire) se déplace par rapport au système de rang plus élevé. Ce mouvement est décrit par un modèle cinématique au niveau hiérarchiquement supérieur. D'autre part, les points se déplacent également les uns par rapport aux autres à l'intérieur d'un même système de référence. L'indication d'un vecteur de déplacement associé à chaque point du cadre de référence permet la description de ces mouvements internes au système. Le cadre de référence d'un système dynamique comporte de ce fait des «séries de vitesse» en plus des séries de coordonnées. En conséquence, il convient d'indiquer, outre les coordonnées d'un cadre de référence dynamique, l'époque à laquelle elles s'appliquent, par exemple ITRF93(1995.4). Les séries de vitesses ou modèles de vitesses permettent alors de convertir des coordonnées d'une époque à une autre au sein d'un même cadre de référence.

ITRS (cadre de référence : ITRFyy)

Le système de référence terrestre du SIRT (IERS Terrestrial Reference System, ITRS) applicable au plan mondial a été défini par le Service international de la rotation terrestre (SIRT ou International Earth Rotation Service, IERS) afin de décrire géométriquement des coordonnées de stations données, à l'aide de la géodésie par satellites (télémétrie laser sur satellites (Satellite Laser Ranging, SLR) ou sur la Lune (Lunar Laser Ranging, LLR), radio-interférométrie à longue base (Very Long Baseline Interferometry, VLBI), GPS). L'ITRS est actuellement le "Système conventionnel terrestre (Conventional Terrestrial System)" par excellence.

Depuis 1988, l'ITRS est réalisé chaque année dans le "Cadre de référence terrestre international (International Terrestrial Reference Frame, ITRF)", ce qui signifie qu'il est procédé à une nouvelle détermination des



coordonnées et des vitesses des points de l'ITRF. L'indication de l'année de réalisation (ITRF88, 89, 90 jusqu'à ITRF96, actuellement) permet de distinguer les différentes réalisations les unes des autres. Ces valeurs donnant l'année de réalisation ne doivent pas être confondues avec les indications des époques (par exemple 1993.0), lesquelles résultent du mouvement des points avec le temps au sein d'un seul et même ITRF. Les différents ITRFyy peuvent en fait être considérés comme des réalisations successivement affinées ne se différenciant les unes des autres, principalement au cours des toutes dernières années, que de quelques millimètres ou centimètres (pour autant qu'elles se rapportent à la même date !).

L'utilisateur du GPS est principalement confronté à l'ITRS lorsqu'il exploite ses observations GPS avec des éphémérides précises ("Precise orbits"), celles-ci étant déterminées dans l'ITRS par le service GPS international de géodynamique (International GPS Service for Geodynamics, IGS) ainsi que par d'autres centres de calcul.

L'ellipsoïde GRS80 (Geodetic Reference System (système géodésique de référence) 1980) est utilisé en tant qu'ellipsoïde de référence pour l'ITRS.

ETRS89 (cadre de référence : ETRFyy, EUREF)

Le Système de référence terrestre européen 1989 (European Terrestrial Reference System 1989, ETRS89) a été déduit de l'ITRS (cf. ci-avant) comme système de référence global et commun aux mensurations nationales européennes. Son échelle et l'origine de ses coordonnées sont identiques à celles de l'ITRS. La valeur d'année (ETRS-)89 ne désigne que l'année durant laquelle la décision de réalisation a été prise, aucune autre signification ne lui est attachée !

La réalisation de l'ETRS89 s'est traduite par le Cadre de référence terrestre européen (European Terrestrial Reference Frame 89, ETRF89), lequel coïncide avec l'ITRF89 à la date 1989.0. Aux dates ultérieures, ITRFyy et ETRFyy diffèrent de plusieurs centimètres par an en raison des mouvements de la plaque eurasiatique (cf. ci-avant). Les cadres de référence postérieurs ETRF90, 91, 92 jusqu'à ETRF96 sont à considérer comme des affinements de la réalisation initiale.

Le Cadre de référence européen (European Reference Frame, EUREF) désigne le réseau GPS européen densifié sous-tendant le cadre de référence ETRF89.

L'ellipsoïde GRS80 (Geodetic Reference System (système géodésique de référence) 1980) est utilisé en tant qu'ellipsoïde de référence pour l'ETRS.

CHTRS95 (cadre de référence : CHTRFyy)

La compatibilité avec d'autres pays pourrait pousser la Suisse à adopter ETRS89 comme système de référence positionné globalement. Toutefois, les données tectoniques propres à la Suisse (soulèvement alpin, etc.) pouvant la différencier du reste de l'Europe, la décision a été prise de définir, au cours d'une nouvelle mensuration nationale, un système de référence spécifique, dynamique et global: le Système de référence terrestre suisse ou Swiss Terrestrial Reference System 1995 (CHTRS95). Le système CHTRS95 se dissocie au niveau intra continental de l'ETRS89 comme ce dernier le fait par rapport à l'ITRS au niveau intercontinental (cf. ci-avant). Un modèle cinématique, CHKM95 (KM signifiant Kinematic Model), doit plus particulièrement décrire les déplacements locaux (à l'échelle nationale) par rapport au point fondamental, en plus de la dissociation régionale par rapport à l'ETRS89, mentionnée ci-dessus.

Le système CHTRS95 a été réalisé dans le Cadre de référence terrestre suisse ou Swiss Terrestrial Reference Frame 1995 (CHTRF95), lequel – pour simplifier – a été ajusté dans l'ETRF93 à la date 1993.0. La position de la Suisse par rapport au restant de l'Europe pouvant être considérée comme stable, les cadres CHTRF95 et ETRF93 sont identiques jusqu'à nouvel ordre. Cela signifie également que le modèle cinématique CHKM95 est pour le moment égal à 0. Un nouveau cadre de référence CHTRF98 est actuellement en cours d'élaboration à partir de nouvelles mesures sur les points du réseau.

L'ellipsoïde GRS80 (Geodetic Reference System (système géodésique de référence) 1980) est utilisé en tant qu'ellipsoïde de référence pour le système CHTRS95, comme pour l'ITRS et l'ETRS. Une projection UTM est prévue en tant que projection cartographique éventuelle.

Les domaines d'application concernés par le CHTRS95 sont avant tout les sciences géodésiques, l'échange de données avec l'étranger ainsi que les réseaux de base de grands projets (tels qu'AlpTransit). CHTRS95 n'est pas adapté à une utilisation en mensuration officielle du fait de son caractère dynamique et de l'absence de référence au plan cartographique, raison pour laquelle le système de référence statique CH1903+ (cf. § 3.2) en a été déduit.

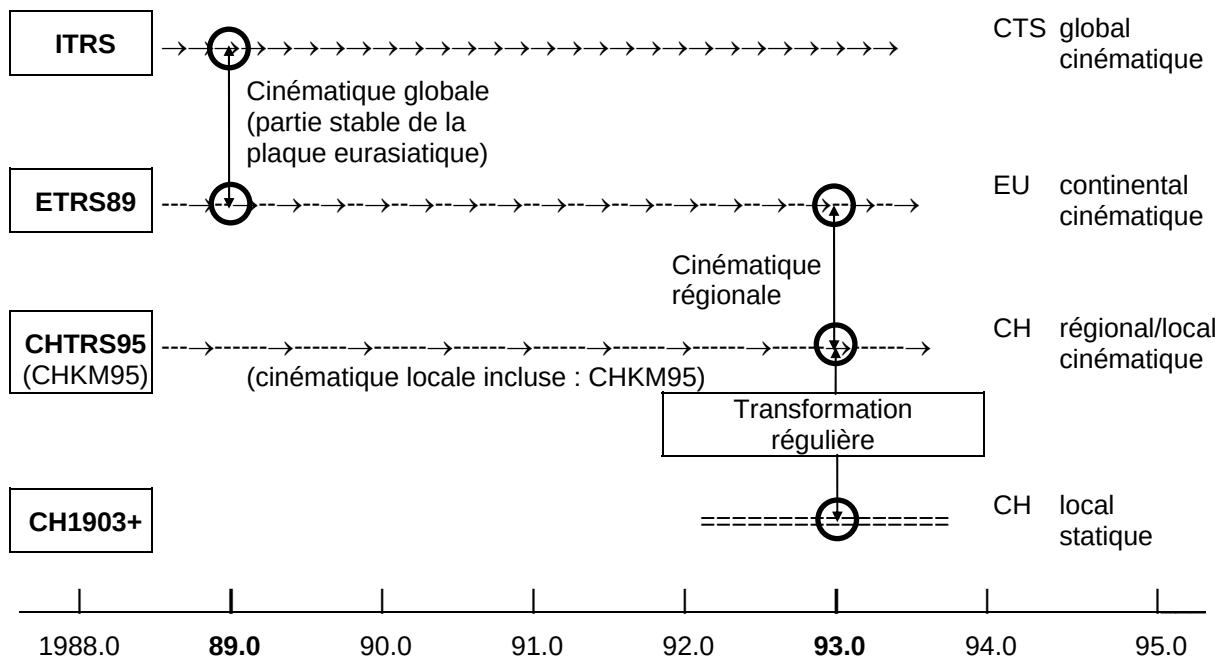


Fig. 3.1-1 : Systèmes de référence dynamiques et statiques [Schneider et al. (en préparation)]

WGS84

Le Système géodésique mondial (World Geodetic System 1984, WGS84) est le système de référence à l'échelle planétaire du GPS, dans lequel sont exprimées les éphémérides des satellites, ceux-ci les retransmettant vers la Terre (éphémérides radiodiffusées ou "broadcast ephemerides"). Conçu au départ pour des utilisations militaires, l'inconvénient majeur du WGS84, considéré en tant que système de référence, réside dans le fait qu'aucun cadre de référence associé comportant des points matérialisés à la surface de la Terre n'est disponible pour un utilisateur civil. Les satellites GPS représentent pour ainsi dire l'unique réalisation du WGS84 pour ce dernier, une détermination de position par rapport à un point WGS84 au sol n'est donc pas possible. En raison des effets de la disponibilité sélective (Selective Availability ou S/A) du GPS, une détermination de position *absolue* à l'aide des satellites GPS n'est possible qu'à une précision de l'ordre de 1 à 2 mètres; en d'autres termes, le WGS84 n'est réalisable qu'à 1 ou 2 mètres près par voie *terrestre* pour des utilisateurs civils. Avant 1994, la réalisation du WGS84 coïncidait avec ITRF89 à une précision métrique et a été adaptée en 1994 et en 1996 à ITRF92 puis à ITRF94. **En raison des insuffisances mentionnées que présente WGS84 en tant que système de référence pour l'utilisateur civil, il est conseillé de toujours rattacher les mesures GPS à un autre système de référence (ITRS, ETRS89 ou CHTRS95 (réseau MN95)) et de procéder à l'exploitation des données dans ce dernier système.** Cette manière de procéder permet un positionnement clair puis une transformation ultérieure bien définie vers d'autres cadres de référence. Par ailleurs, ITRS, ETRS89 et CHTRS95 coïncident simultanément (de manière approchée mais suffisante) avec le système de référence des orbites radiodiffusées des satellites.

WGS84 utilise l'ellipsoïde du même nom, lequel ne diffère que très peu de l'ellipsoïde GRS80.

3.2 Systèmes de référence statiques locaux

Dans la suite, on appellera systèmes de référence locaux des systèmes dont l'origine ne coïncide pas avec le centre de gravité des masses terrestres (cf. aussi § 2.1), au contraire des systèmes conventionnels terrestres ("Conventional Terrestrial Systems") positionnés de manière globale.

CH1903 (cadre de référence : MN03 / NF02)

Le système de référence CH1903 a été défini en 1903 par M. Rosenmund pour la mensuration nationale suisse [Rosenmund 1903] et est **actuellement employé pour la grande majorité des travaux de mensuration effectués en Suisse, la totalité de la mensuration officielle comprise.** Il utilise l'ellipsoïde de Bessel 1841 comme ellipsoïde de référence, positionné à environ 700 mètres du centre de gravité des



masses terrestres de façon à s'approcher au plus près du contour du géoïde en Suisse (cf. Fig. 2.1-4). La projection cartographique suisse est ensuite appliquée sur cette base (cf. § 2.3). En raison de l'importance particulière de la direction du nord en mensuration, la coordonnée nord a été baptisée X et la coordonnée est Y, ce qui a donné naissance à un système de coordonnées en projection indirect. L'attribution des coordonnées $y=600'000$ m (faux est ou false easting) et $x=200'000$ m (faux nord ou false northing) pour l'origine des coordonnées se trouvant à Berne n'est intervenue que plus tard (initialement pour des raisons purement militaires). Ce procédé a pour principal avantage que tout point du territoire suisse possède des coordonnées positives, la coordonnée y étant par ailleurs toujours supérieure à la coordonnée x. Ce "système militaire" a supplanté le "système civil" initial, également pour la plupart des travaux techniques de mensuration. Le cadre de référence associé est subdivisé en deux parties: le réseau national MN03 (ou "coordonnées nationales") pour la planimétrie et le nivellement fédéral NF02 (altitudes usuelles, rattaché au repère de la Pierre du Niton dans la rade de Genève) pour l'altimétrie.

Du fait des possibilités limitées dont disposait la mensuration à cette époque, les cadres de référence MN03 et NF02 présentent des échelles et des déformations localement différentes. Pour ce qui concerne le cadre de référence altimétrique, il ne s'agit par ailleurs que d'altitudes usuelles puisque aucune valeur gravimétrique n'a été prise en compte dans le calcul, ce qui rend en particulier impossible la conversion rigoureuse d'altitudes ellipsoïdiques déterminées par GPS (même dans le cas d'une connaissance précise du géoïde). Une difficulté supplémentaire vient encore s'ajouter pour l'utilisateur du GPS, à savoir qu'il n'existe pas de relation rigoureuse liant le système de référence local CH1903 et les systèmes de référence globaux utilisés par le GPS, en raison des déformations. C'est pourquoi le projet de la "nouvelle mensuration nationale MN95" a été lancé par le S+T, lequel a finalement conduit à l'élaboration des nouveaux systèmes de référence CHTRS95 et CH1903+ et des cadres de référence CHTRF95 et MN95 / RNA95.

CH1903+ (cadre de référence : MN95 / RNA95)

Le système de référence CH1903+ **va devenir le nouveau système de référence pour la mensuration officielle et, par la suite, pour la grande majorité des autres travaux de mensuration effectués en Suisse**. Ses cadres de référence MN95 (tridimensionnel) et RNA95 (uniquement altimétrique) seront appelés à moyen terme à remplacer les anciens cadres de référence MN03 et NF02. Le système CH1903+ est directement déduit du CHTRS95 positionné de manière géocentrique, en considérant ce dernier comme statique, en le déplaçant vers l'ancien système de référence CH1903 par l'intermédiaire d'un vecteur parfaitement défini (3 translations) et en utilisant l'ellipsoïde de Bessel 1841 (employé jusqu'alors) en tant qu'ellipsoïde de référence en combinaison avec la projection suisse (cf. Fig. 3.1-1). On parvient ainsi à ce que l'écart entre les coordonnées en projection d'un même point dans l'ancien cadre de référence (MN03) et dans le nouveau (MN95) ne dépasse pas un maximum de 2 mètres, soit une valeur qui reste imperceptible pour de nombreux utilisateurs (ceux des cartes nationales en particulier). Le positionnement local permet par ailleurs de maintenir les ondulations du géoïde à un faible niveau. Afin d'éviter toute confusion entre les coordonnées des deux cadres de référence, les coordonnées en projection en MN95 sont précédées d'un 2, respectivement d'un 1 (faux est, faux nord: 2'600'000 m, 1'200'000 m).

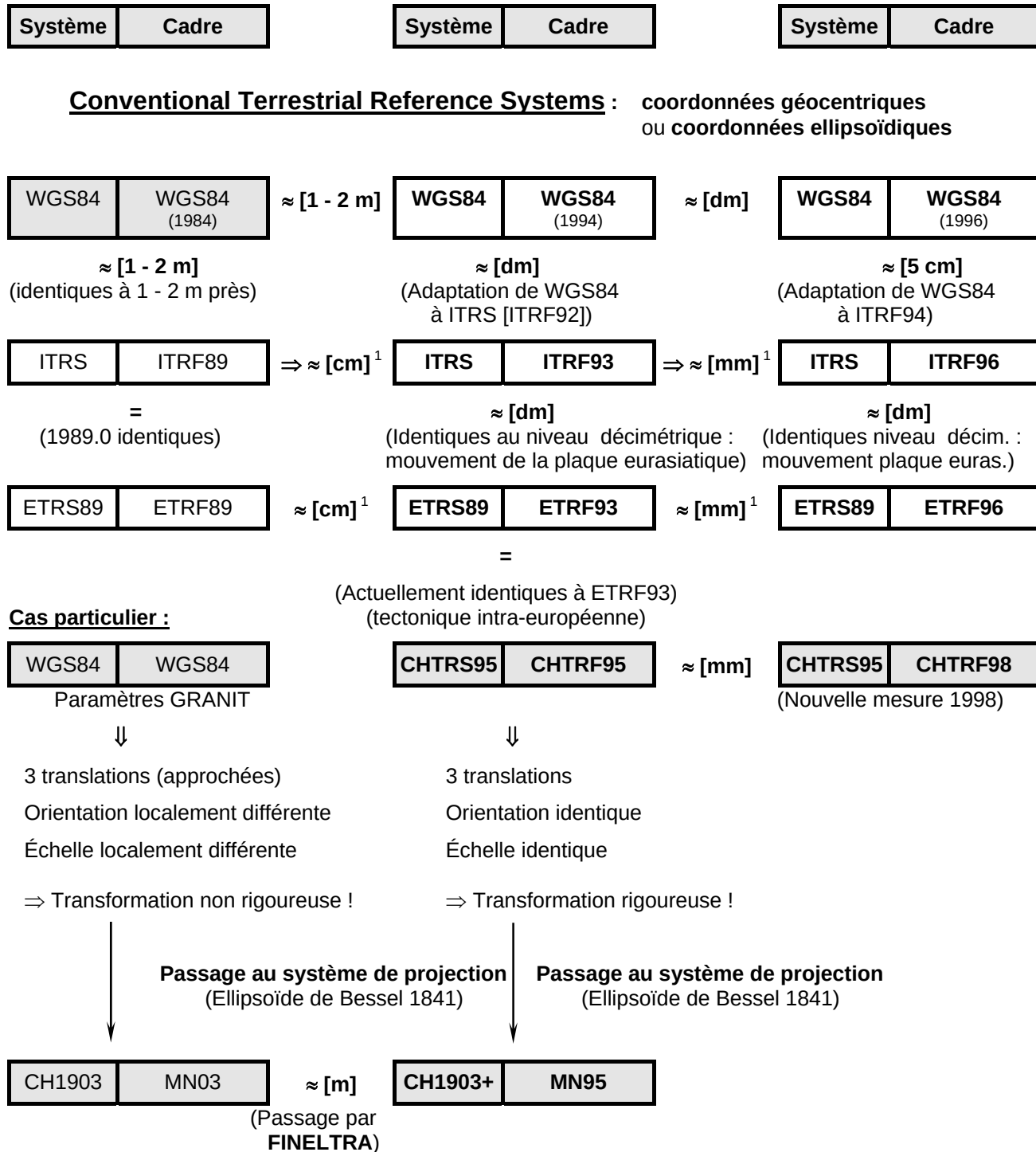
Le nouveau cadre de référence MN95 permet de remédier aux inconvénients de l'ancien réseau national MN03 mentionnés ci-dessus. Il est pratiquement exempt de déformations (écart type relatif entre deux coordonnées planimétriques quelconques < 1 cm) et ses coordonnées peuvent être converties dans les systèmes de référence globaux par application d'une translation simple et rigoureuse (cf. § 4.4.2 et annexe A).

Le nouveau cadre de référence altimétrique RNA95 contient des altitudes orthométriques rigoureuses qu'il est possible de transformer en altitudes ellipsoïdiques (GPS) avec une précision de 1 à 3 cm en faisant appel au nouveau modèle de géoïde de la Suisse (CHGEO98R) [Marti 1997 et 1998]. Les altitudes RNA95 sont également rattachées au repère de la Pierre du Niton et ne diffèrent des anciennes altitudes NF02 que de 50 cm au maximum.



Échelle de temps :

Changements de datum



Systèmes de projection : coordonnées en projection ("coordonnées nationales")
avec altitudes usuelles NF02 resp. altitudes orthométriques RNA95

Source : [Wiget 1997]

¹ = pour les mêmes époques

Fig. 3.2-1 : Tableau récapitulatif des différents systèmes et cadres de référence



4 Transformations de coordonnées entre cadres de référence

D'une manière générale, les coordonnées décrivent des positions par rapport à un point de référence spécifique (l'origine) ou dans un cadre de référence spécifique. Des coordonnées différentes sont associées au même point suivant le cadre de référence dans lequel elles sont exprimées. Dès que plusieurs cadres de référence sont utilisés, il est indispensable de préciser, pour chaque coordonnée, le cadre de référence auquel elle est associée.

Un point peut simultanément être décrit dans différents systèmes de coordonnées au sein *d'un seul et même cadre de référence* :

- système géocentrique de coordonnées cartésiennes (X, Y, Z)
- système de coordonnées ellipsoïdiques (longitude L, latitude B, altitude ellipsoïdique h)
- éventuellement système de coordonnées en projection (y, x, altitude orthométrique / altitude usuelle H)

Le passage, au sein d'un même cadre de référence, de l'un de ces systèmes de coordonnées à un autre s'effectue par une conversion ne posant pas de problèmes de précision, au contraire de la transformation d'un cadre de référence à un autre, pour autant que les données associées (formules des projections, paramètres d'ellipsoïdes et éventuellement cotes du géoïde) soient connues.

4.1 Principales méthodes de changement de datum

La transformation de coordonnées d'un cadre de référence dans un autre cadre de référence (appelée changement de datum) s'opère classiquement au moyen d'une transformation de similitude (dans l'espace) effectuée dans le système géocentrique des coordonnées cartésiennes (cf. Fig. 4.1-1); cependant, certains systèmes de coordonnées cartésiennes sont qualifiés de "géocentriques" alors que leur origine ne coïncide pas avec le centre de la Terre. La transformation est décrite par trois (uniquement des translations) à sept paramètres (3 translations, 3 rotations, 1 échelle) en fonction des hypothèses posées (parallélisme des axes, identité d'échelle). Les paramètres de transformation sont habituellement connus de manière approchée ou fixés par définition ; toutefois, ils peuvent également être évalués au moyen de points d'ajustage locaux de coordonnées connues dans les deux cadres de référence (transformation de Helmert, cf. § 4.4.3). Au contraire des simples conversions entre systèmes de coordonnées, la question de la précision à laquelle le changement de datum peut être réalisé se pose toujours dans le cas de la transformation entre deux cadres de référence, la réponse à cette interrogation conditionnant parfois le choix ou la mise à l'écart d'un cadre de référence donné.

De très grossières approximations des différences de coordonnées entre deux cadres de référence peuvent être interpolées graphiquement sur des cartes d'isolignes (cf. annexe E).

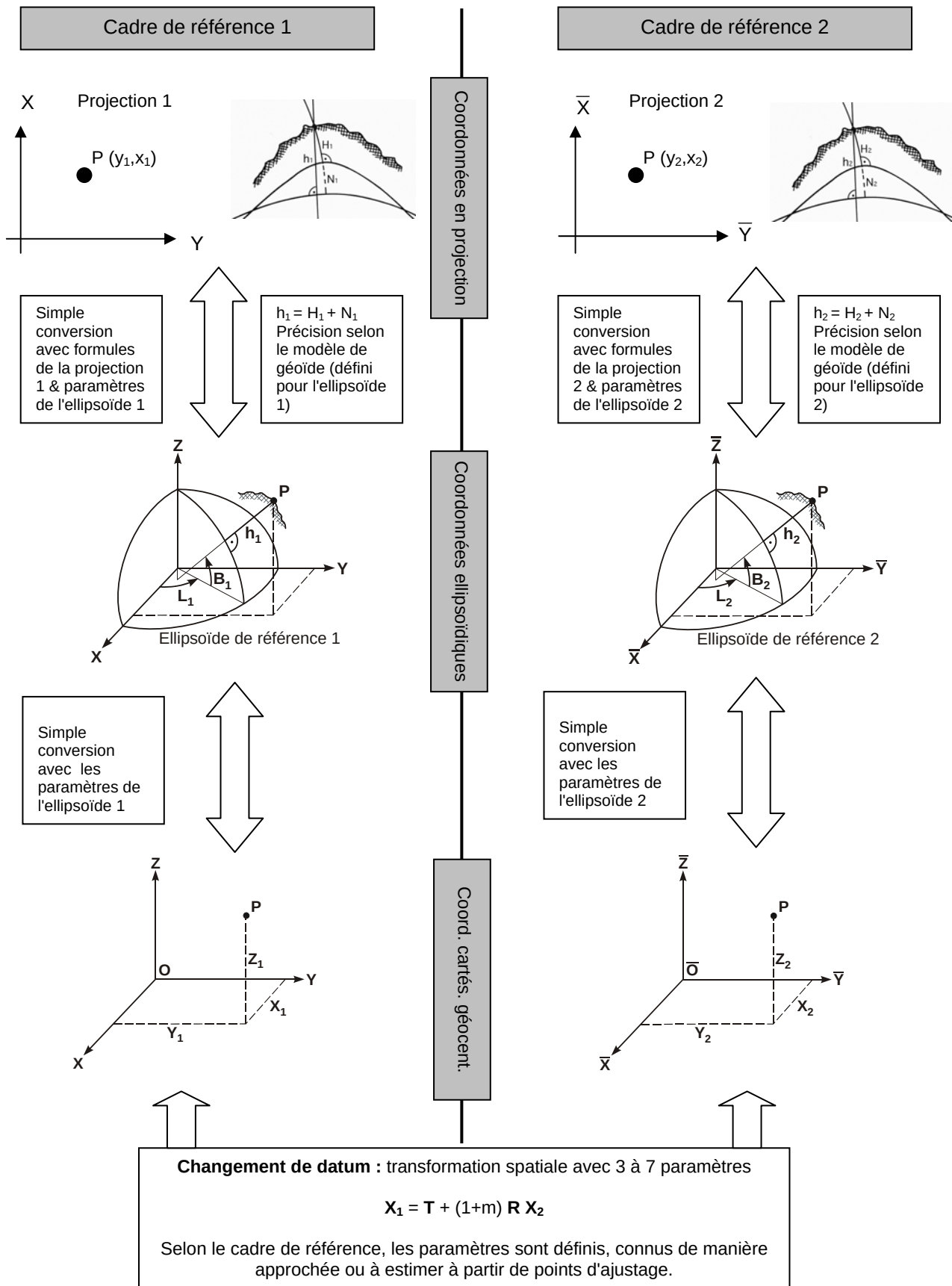


Fig. 4.1-1 : Systèmes de coordonnées et cadres de référence



4.2 Transformations entre cadres de référence globaux

Le SIRT (ou IERS en anglais) publie des paramètres de transformation pour le passage entre différentes réalisations de l'ITRS ou de l'ETRS89. CHTRF95 et ETRF93 sont pour l'heure identiques. Le programme COOVEL est disponible au S+T pour la conversion de coordonnées entre différents cadres de référence globaux ainsi qu'entre diverses époques. En raison de la coïncidence au niveau décimétrique (cf. § 3.1) de tous les cadres de référence mentionnés ici (ITRFyy, ETRFyy, CHTRFyy), ces derniers répondent en principe aux exigences courantes posées par l'exploitation d'observations GPS, c'est pourquoi les transformations entre cadres de référence différents ne seront pas plus détaillées dans ce document.

4.3 Transformations entre cadres de références locaux (MN03 ↔ MN95)

Au S+T, la transformation directe entre les cadres de référence locaux MN03 et MN95 (ancienne et nouvelle mensuration nationale) s'effectue au moyen du programme FINELTRA, lequel utilise une transformation affine réalisée sur des éléments finis (des triangles) afin de modéliser les déformations locales de MN03 par rapport à MN95. La précision de la transformation dépend entre autres de la qualité des points d'appui et de la densité (continuellement améliorée) du maillage triangulaire. La précision est actuellement de l'ordre de 10 à 30 cm sur le Plateau et est légèrement inférieure dans la zone alpine. Des informations plus détaillées concernant FINELTRA sont publiées dans [Manuel d'utilisation FINELTRA, Bulletin du S+T 26, disponible auprès du S+T].

Un procédé similaire est prévu pour le passage entre les cadres de référence altimétriques NF02 et RNA95. Cependant, un algorithme de conversion sur le modèle de celui utilisée par FINELTRA n'est pas encore disponible pour l'heure.

4.4 Transformations entre cadres de référence locaux et globaux

Tous les travaux de mensuration effectués en Suisse, ou presque, mensuration officielle comprise, sont réalisés dans les cadres de référence locaux et statiques MN03 ou MN95 (pour le choix du cadre de référence, cf. § 3.2 et [Gubler et al. 1995]). Les systèmes de référence globaux (ITRS, ETRS89, CHTRS95, WGS84) restent réservés à des applications spécifiques, mais représentent néanmoins des "systèmes de travail" indispensables pour tout utilisateur du GPS en leur qualité de systèmes de référence GPS ou compatibles avec le GPS. Il est par conséquent nécessaire de décrire ici plus en détail les principales méthodes de transformation entre cadres de référence locaux (MN03, MN95) et globaux (exemple type : ETRF93).

Les changements de datum par rapport à MN03 et à MN95 sont traités séparément pour des raisons de clarté. Une combinaison (judicieuse) des méthodes décrites peut bien entendu se révéler opportune dans le cadre d'un projet GPS, en particulier lorsque MN03 doit encore être utilisé en tant que cadre de référence pour des raisons pratiques mais que l'on désire néanmoins tirer profit des avantages de MN95 (relation rigoureuse avec le système global) (cf. § 4.4.3). Cependant, il est absolument nécessaire dans un tel cas d'avoir pleinement conscience de la précision des méthodes employées ou des coordonnées qui en résultent.

4.4.1 Les programmes GPSREF, NAVREF et CHGEO98R du S+T

Le S+T propose le programme GPSREF pour la transformation de coordonnées de systèmes de coordonnées différents entre les cadres de référence MN03, resp. MN95 et CHTRF95/ETRF93. Le programme NAVREF est à disposition pour des exigences plus modestes, il convertit des séries isolées de coordonnées suisses en projection en coordonnées ellipsoïdiques dans un système global, ou inversement, avec une précision de l'ordre du mètre.

CHGEO98R permet le calcul de cotes du géoïde pour des points quelconques du territoire suisse (MN03 comme MN95) avec une précision relative (fonction de la distance) de 1 à 3 cm.

Ces trois programmes sont disponibles sur le site Internet du S+T à l'adresse <http://www.swisstopo.ch> ou peuvent être acquis auprès du S+T.



4.4.2 MN95 $\Leftrightarrow$ cadre de référence global ETRF93 (= CHTRF95, ~ WGS84) (solution rigoureuse)

La Fig. 4.4-1 détaille la procédure à suivre pour la transformation de coordonnées (dans les deux sens) entre le cadre de référence local MN95 et le cadre de référence global ETRF93 (actuellement identique à CHTRF95 et coïncidant avec WGS84 au niveau du mètre). La représentation suit en fait le déroulement classique d'une campagne GPS: calcul de coordonnées globales (approchées) pour la détermination des lignes de base (étapes 1 à 3), exploitation GPS dans le cadre de référence global, transformation des coordonnées résultantes en MN95 (étapes 4 à 6).

Seules les étapes 4 à 6 sont d'importance pour la transformation dans la mensuration nationale MN95 de coordonnées globales quelconques (ETRF, WGS84, etc.) déterminées de diverses manières. Toutefois, la précision des coordonnées MN95 résultantes dépend naturellement de la précision des coordonnées (globales) initiales ou de la manière dont elles ont été obtenues (cf. ci-dessous: un cas particulier de la MO). L'avantage principal de MN95 par rapport à MN03 réside dans le fait que le changement de datum vers les cadres de référence globaux ETRF93 et CHTRF95 peut s'opérer sans perte de précision. Dans le cas idéal, les points nouveaux sont ainsi déterminés par rattachement à des points connus en MN95 (Fig. 4.4-1: étapes 1 à 3), ce qui permet le calcul direct (sans intégration contrainte ultérieure) de coordonnées MN95 dans les limites de la précision de mesure du GPS.

La Fig. 4.1-1 expose les aspects théoriques sur lesquels ces déterminations prennent appui. Des exemples numériques (en annexe F) illustrent les différentes étapes de calcul. Les formules et les paramètres utilisés figurent également en annexe.

Un cas particulier de la MO : souvent, en mensuration officielle, les coordonnées originales d'exploitations GPS antérieures dans un cadre de référence global (généralement WGS84 approché) sont encore disponibles. On souhaiterait aujourd'hui transformer ces coordonnées dans la nouvelle mensuration MN95. Les coordonnées WGS84 (géocentriques cartésiennes) dont on dispose peuvent à cette fin être considérées comme des coordonnées ETRF approchées et être soumises directement aux étapes 4 à 6 décrites sur la Fig. 4.4-1. Les coordonnées en projection résultantes ne constituent toutefois que des coordonnées MN95 approchées (avec une précision de 1 à 2 mètres). De ce fait, elles doivent toujours être intégrées dans le cadre de référence MN95 au moyen d'une compensation (LTOP) ou d'une transformation locale (comportant 3 à 7 paramètres).

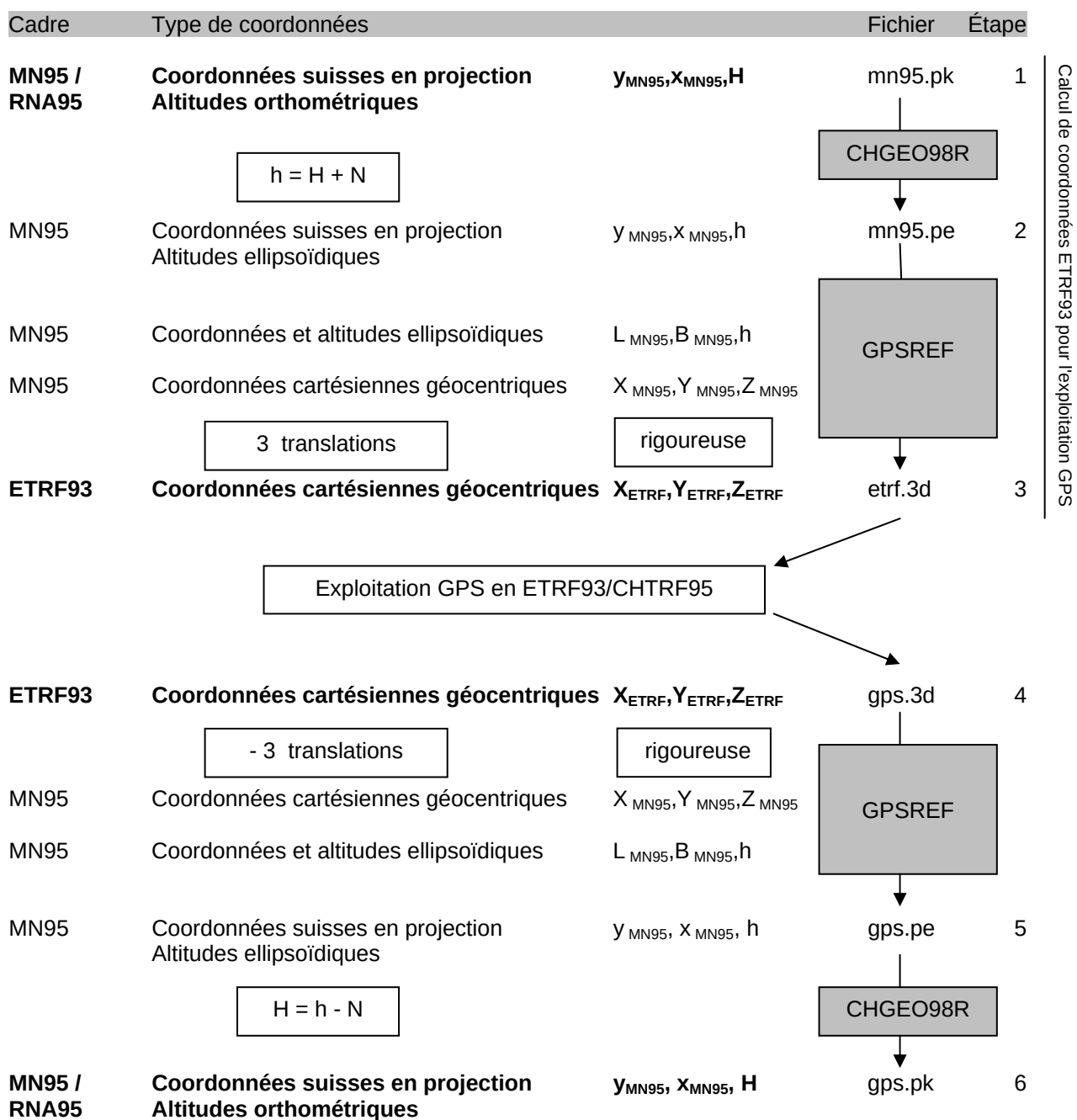


Fig. 4.4-1 : Transformation de coordonnées MN95 $\leftrightarrow$ ETRF93/CHTRF95

⇒ La précision locale par rapport aux points MN95 locaux se compose de la précision de réalisation du cadre MN95/RNA95 et de la précision (interne) des mesures GPS, à quoi s'ajoute la précision de détermination du géoïde dans le cas des altitudes. Lorsque les mesures GPS sont précises, l'erreur moyenne du point est de l'ordre de quelques centimètres.

⇒ Une compensation contrainte (par LTOP) sur des points existants en MN95 permet éventuellement d'élever la précision pour l'amener dans une plage de ± 1 cm.



4.4.3 MN03 / NF02 $\Leftrightarrow$ cadre de référence global ETRF93 (= CHTRF95, ~ WGS84) (solution approchée)

Ce changement de datum n'est réalisable que de manière approchée en raison des déformations locales du cadre de référence MN03. Différentes solutions sont possibles, selon la précision requise (pour l'approximation), simples ou exigeant un volume de travail plus important ; elles sont décrites ci-après et les caractéristiques des plus importantes d'entre elles sont détaillées sur la Fig. 4.4-2. La représentation suit en fait le déroulement classique d'une campagne GPS: calcul de coordonnées globales (approchées) pour la détermination des lignes de base, exploitation GPS dans le système de référence global, transformation des coordonnées résultantes en MN03.

Les **solutions** proposées ci-après se différencient en particulier les unes des autres par la manière dont les déformations du cadre MN03 sont prises en compte. La Fig. 4.1-1 permettra au lecteur de mieux comprendre les différentes étapes de la procédure. Les formules et les paramètres utilisés sont décrits en annexe.

La Fig. 4.4-3 confronte enfin ces transformations approchées avec la conversion rigoureuse des coordonnées MN95 en coordonnées ETRF93 (=CHTRF95).

Solution standard à 3 translations

Cette possibilité constitue la **solution standard lorsque** les résultats GPS doivent être localement intégrés de façon contrainte ou interpolés dans le cadre MN03 et qu'il n'existe **aucun moyen de rattachement à MN95**.

Les altitudes usuelles NF02 sont en premier lieu converties en altitudes ellipsoïdiques par addition des cotes du géoïde (CHGEO98R). Les coordonnées en projection MN03 sont transformées en coordonnées ellipsoïdiques (formules de la projection suisse) puis en coordonnées cartésiennes géocentriques CH1903. Trois translations simples (cf. annexe A) permettent de passer de manière approchée à des coordonnées cartésiennes géocentriques ETRF93 ou WGS84 à l'aide desquelles les mesures GPS peuvent être exploitées. La transformation réciproque des résultats GPS en MN03 s'effectue de façon similaire mais en inversant l'ordre des étapes. Les conversions et la transformation sont réalisées à l'aide du programme GPSREF.

La précision relative des coordonnées (en projection) des points nouveaux (réseau GPS) est déterminée par la qualité des mesures GPS. La précision locale par rapport aux points MN03 existants n'est cependant que de l'ordre du mètre car le réseau GPS et le réseau MN03 local sont d'une part en rotation l'un par rapport à l'autre du fait des déformations locales de MN03 et présentent d'autre part des échelles différentes. Ces différences peuvent être réduites par une compensation contrainte (LTOP) ou une interpolation (TRANSINT) dans le réseau MN03 existant, ce qui accroît considérablement la précision locale.

Dans ce processus, les déformations locales du réseau MN03 ne sont prises en compte que lors de la dernière étape, à savoir l'intégration contrainte ou l'interpolation. La séparation opérée entre le changement de datum et la modélisation des déformations locales permet une meilleure analyse de ces dernières.

Si des points de rattachement en MN95 sont disponibles mais que le cadre MN03 est à utiliser comme référence, pour des raisons d'ordre pratique, les avantages du cadre MN95 pourront quand même être mis à profit, au moins partiellement: en effet, les coordonnées MN95 des points de rattachement seront converties en coordonnées ETRF93 conformément à la description du paragraphe 4.4.2 (Fig. 4.4-1: étapes 1 à 3). Cette opération s'effectue sans perte de précision grâce à la relation rigoureuse LV95 $\Leftrightarrow$ ETRF93, de sorte que l'exploitation GPS "rigoureuse" (et donc pas uniquement approchée) peut être réalisée dans le cadre ETRF93. Les coordonnées GPS résultantes sont ensuite converties (à nouveau sans perte de précision) en MN95 (Fig. 4.4-1: étapes 4 à 6). L'ajustage en MN03 ne s'effectue qu'à ce stade au moyen d'une compensation contrainte (LTOP) ou d'une interpolation (TRANSINT), sur le modèle de la solution standard sans points de rattachement MN95 décrite ci-dessus. Ce processus présente l'avantage que les coordonnées MN95 de tous les points nouveaux sont obtenues au cours du calcul des coordonnées MN03 (quasiment sous forme de résultat intermédiaire), ce qui peut être d'un grand intérêt dans l'optique d'un futur changement de cadre pour la MO, raison pour laquelle cette manière de procéder est recommandée pour la MO (et pas uniquement pour elle) car elle constitue la solution idéale à cet égard.



Solution auxiliaire: modélisation des déformations par FINELTRA

Les altitudes usuelles NF02 sont converties en altitudes ellipsoïdiques par l'intermédiaire de CHGEO98R. Les coordonnées en projection MN03 sont transformées de manière approchée en coordonnées en projection MN95 au moyen de FINELTRA, lesquelles sont converties en coordonnées cartésiennes géocentriques CH1903+ (en transitant par des coordonnées ellipsoïdiques). La transformation (de MN95) en ETRF93 qui s'ensuit est définie (de façon rigoureuse) par trois paramètres de translation. Au terme de l'exploitation GPS dans le cadre ETRF93, la transformation réciproque vers MN03 s'effectue de façon similaire mais en inversant l'ordre des étapes.

Cette procédure modélise les déformations locales du réseau MN03 par FINELTRA. La précision locale des coordonnées nationales ainsi déterminées se compose de la précision GPS relative et de la qualité de la transformation par FINELTRA, laquelle dépend des caractéristiques locales et de la densité du maillage triangulaire; en planimétrie, elle est de l'ordre de 10 à 30 cm sur le Plateau et peut atteindre 50 cm dans les zones alpines. FINELTRA ne prenant en compte que les déformations planimétriques, il est fort possible que la précision des altitudes soit inférieure. Un ajustage supplémentaire par le biais, par exemple, d'une compensation contrainte présente moins d'intérêt car la solution standard, plus simple, est à privilégier dans ce cas.

Cette solution permet d'effectuer une transformation de coordonnées à une précision de l'ordre du décimètre et sans intégration contrainte supplémentaire des coordonnées transformées; elle peut de ce fait constituer une possibilité intéressante pour un utilisateur dont les exigences de précision sont un peu moins élevées.

Solution historique: utilisation des paramètres Granit87

Cette solution est employée par quelques utilisateurs pour des raisons historiques et est par conséquent répertoriée ici dans un souci d'intégralité; en principe, elle n'est plus à conseiller. La procédure est identique à celle de la solution standard, à une exception près: le changement de datum ne s'effectue pas au moyen de trois translations mais par l'intermédiaire de sept paramètres de transformation (trois translations, trois rotations, un facteur d'échelle). Le jeu de paramètres appelé Granit87 est utilisé, il a été évalué (de manière similaire au processus décrit ci-après) en 1989 à partir des données GPS de la campagne du même nom s'étendant à 12 points d'ajustage répartis sur l'ensemble du territoire suisse. Ces paramètres permettent un changement de datum approché avec une précision inférieure au mètre. Ils représentent aussi bien les écarts existant entre les deux cadres de référence que les déformations du réseau MN03 pratiquement moyennées sur la totalité de la Suisse. L'inconvénient de cette solution réside également dans la combinaison de ces deux effets: une correction préalable et parfois excessive de déformations (virtuelles) à l'échelle de tout le pays est apportée aux résultats GPS au moyen de cette transformation par les paramètres Granit87, ce qui complique considérablement l'interprétation d'une intégration contrainte ou d'une interpolation consécutive. Les paramètres Granit87 sont par ailleurs devenus obsolètes, parce que calculés pour le système ayant précédé l'actuel ITRS. La solution standard déterminée au moyen de trois seuls paramètres de translation permet une approximation du changement de datum de qualité pratiquement équivalente tout en requérant un volume de calcul inférieur. Elle permet en outre une interprétation plus facile de l'intégration contrainte effectuée postérieurement. L'utilisation des paramètres Granit87 est actuellement à déconseiller pour l'ensemble de ces raisons.

Solution impliquant la détermination de paramètres de transformation locaux (non représentée)

Une possibilité supplémentaire consiste à exécuter le changement de datum par une transformation de Helmert à 7 paramètres, comme dans la solution précédente, en utilisant toutefois des paramètres locaux à la place des paramètres Granit87 prédéfinis. Ces paramètres locaux doivent être déterminés à partir de points d'ajustage connus en coordonnées dans les deux cadres de référence. Une estimation des paramètres effectuée avec une certaine redondance (sur plus de trois points d'ajustage) permet de contrôler la qualité des points d'ajustage. Elle est vivement conseillée. Les paramètres de transformation locaux modélisent aussi bien le changement de datum que les déformations locales du réseau MN03 et cela de façon d'autant plus précise que les déformations seront plus homogènes ou que les points d'ajustage seront plus représentatifs de la zone qu'ils couvrent. Ils permettent la transformation LV03 $\leftrightarrow$ ETRF93 jusqu'au niveau décimétrique mais leur domaine de validité n'excède pas les limites de la zone couverte par les points d'ajustage. Ceux-ci sont donc à choisir de manière judicieuse, en bordure de zone en particulier.

Pour les mêmes raisons que celles opposées à la solution faisant intervenir les paramètres Granit87 (combinaison du changement de datum et des déformations locales), il est déconseillé d'utiliser les paramètres de transformation en conjonction avec une intégration contrainte consécutive. Ils offrent cependant des



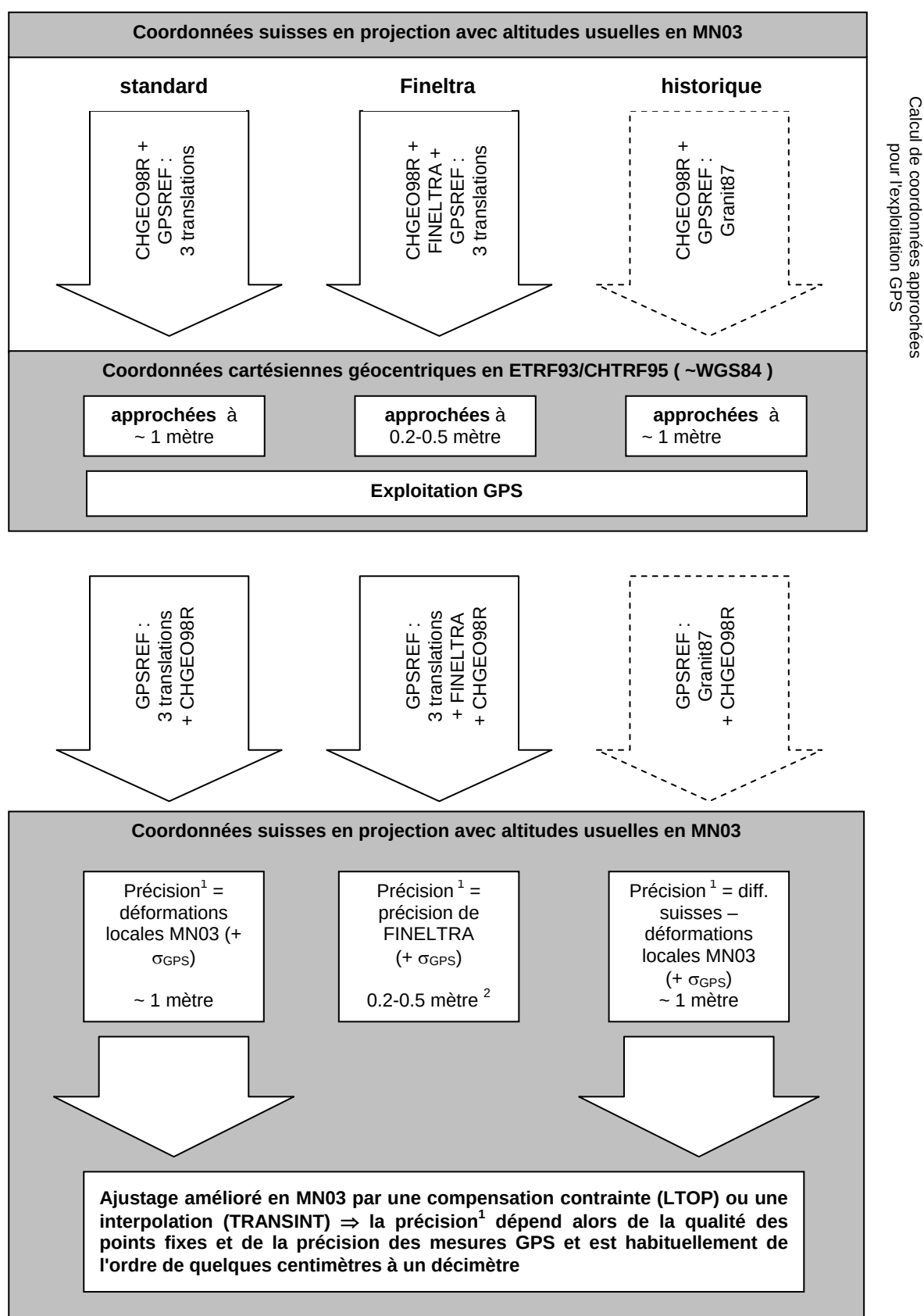
possibilités intéressantes pour des applications spéciales moins exigeantes au niveau de la précision pour lesquelles une compensation ultérieure ou une transformation par FINELTRA n'est pas possible, ce qui est le cas par exemple d'une implantation en temps réel en GPS RTK.

Solution approchée: utilisation de formules approchées et de cartes d'isolignes (non représentée)

Des formules approchées permettant une conversion sommaire et directe entre des coordonnées ellipsoïdiques WGS84 et des coordonnées suisses en projection avec une précision métrique figurent en annexe D.

La même conversion, toutefois graphique et non numérique, est possible avec les cartes nationales suisses mises à jour après 1998, celles-ci indiquant (en bleu) les latitudes et les longitudes par rapport à WGS84 en bordure de carte, à titre d'information supplémentaire.

Les cartes d'isolignes de l'annexe E permettent elles aussi d'effectuer une estimation grossière du même changement de datum.



¹ par rapport aux points locaux en MN03 ² cf. explications fournies

Fig. 4.4-2 : MN03 / NF02 ⇔ ETRF93 / CHTRF95 (~ WGS84)

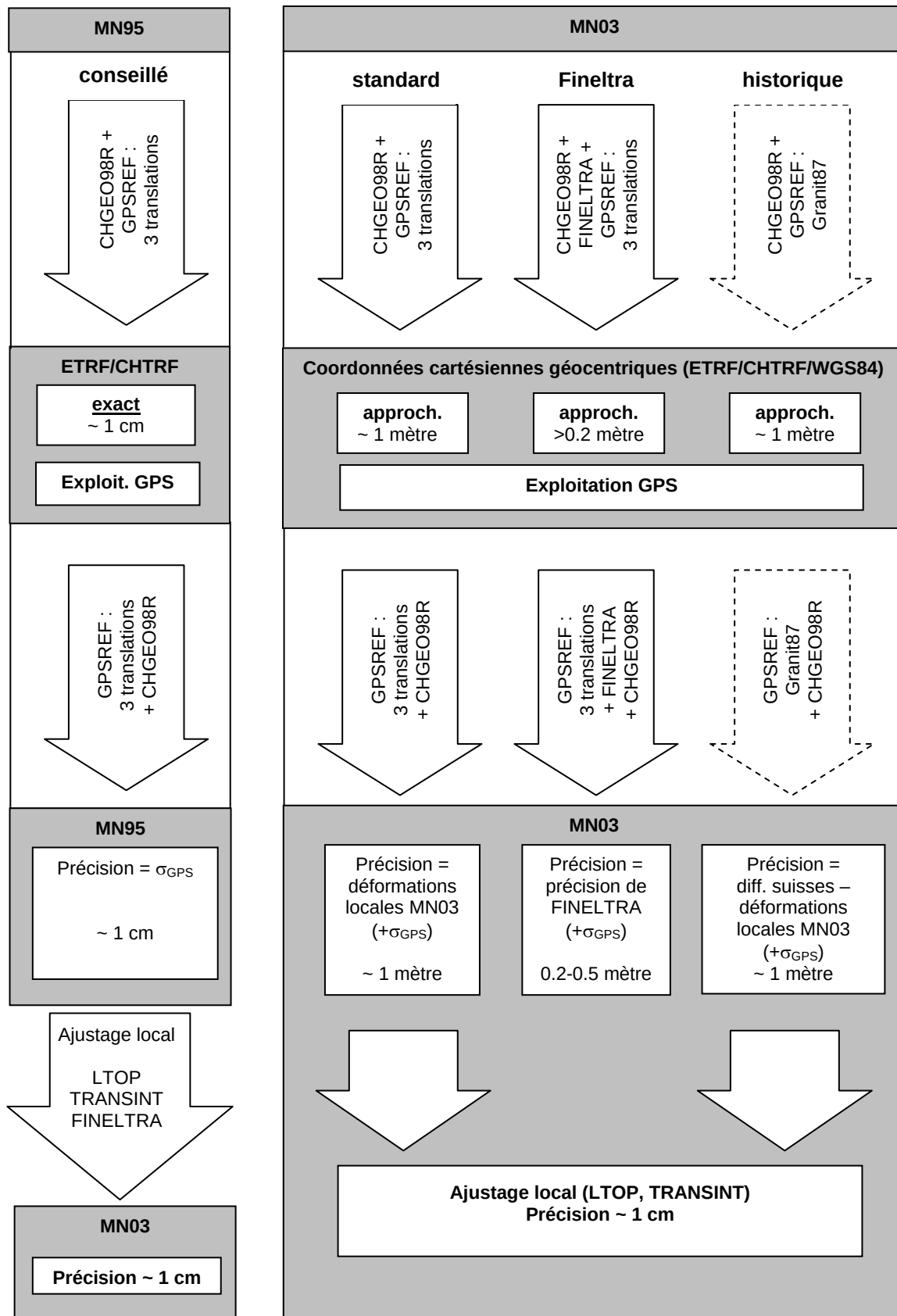


Fig. 4.4-3 : Récapitulation des transformations



5 Sources et références bibliographiques complémentaires

- Bauer M. (1992): Vermessung und Ortung mit Satelliten. Wichmann, Karlsruhe 1992.
- Bolliger J. (1967): Die Projektionen der schweizerischen Plan- und Kartenwerke, Druckerei Winterthur AG, Winterthur 1967.
- Boucher C. et Altamimi Z. (1996): The ITRF and its relationship to GPS. Adresse Internet: <http://schubert.ign.fr:8000/CIAG/WITRF/ITRF-GPS.html>.
- Bühlmann M. (1997): Pilotprojekt DGPS. Technischer Bericht 97-41, S+T, Wabern 1997.
- Dupraz H. (Ed., 1990): Cours sur la méthode GPS, 26-28 mars 1990, textes rassemblés. DGR – EPFL, Lausanne 1990.
- Dupraz H. (1997): La méthode GPS. DGR – IGEO, EPFL, Lausanne 1997.
- Elmiger A. et Chaperon F. (1997): Landesvermessung – Texte und Notizen zur Vorlesung. Bände 1+2, Institut de géodésie et de photogrammétrie, EPFZ, Zurich 1997.
- Gubler et al. (1995): Documentation pour la journée d'information MN95, 13.10.1995, S+T, Wabern 1995.
- Kahle H.-G. (1988): Einführung in die Höhere Geodäsie, Verlag der Fachvereine, Zurich 1988.
- Marti U. (1997): Geoid der Schweiz 1997, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz Band 56, Schweizerische Geodätische Kommission (Commission géodésique suisse), Zurich 1997.
- Marti U. (1998): Das Geoid der Schweiz 1998, Technische Ergänzungen zur Neuberechnung des Geoids der Schweiz, Technischer Bericht 98-25, S+T, Wabern 1998.
- Marti U. (1998): Beschreibung der Subroutinen zur Berechnung von Koordinatentransformationen, GEOREF-LIB (en préparation), S+T, Wabern 1998.
- Rosenmund M. (1903): Die Änderung des Projektionssystems der schweizerischen Landesvermessung, Verlag der Abteilung für Landestopographie; Haller'sche Buchdruckerei, Berne 1903.
- Scherrer R. : The WM GPS Primer, Wild Heerbrugg Ltd., Heerbrugg.
- Schneider D., Gubler E. et Wiget A. (1996): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95', Teil 1, Vorgeschichte, Konzept, Projektorganisation und Planung. Berichte aus der L+T, Bericht 6, Wabern 1996.
- Schneider D., Gubler E., Marti U. et Gurtner W. (en prép.): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95', Teil 3, Terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen. Berichte aus der L+T, Bericht 8.
- Schödlbauer A. (1992): Rechenformeln und Rechenbeispiele zur Landesvermessung, Teile 1 und 2, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1992.
- Seeber G. (1989): Satellitengeodäsie, de Gruyter, Berlin 1989.
- Torge W. (1975): Geodäsie. Sammlung Götschen 2163, de Gruyter, Berlin 1975.
- Wiget A. (1996): Bestimmung von WGS84-Koordinaten für Objekte der zivilen Luftfahrt in der Schweiz. Technischer Bericht 96-13, S+T, Wabern 1998.
- Wirth B. (1990): Höhensysteme, Schwerepotentiale und Niveauflächen. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz Band 42, Schweizerische Geodätische Kommission (Commission géodésique suisse), Zurich 1990.



6 Abréviations utilisées

CH1903	Système de référence de la mensuration nationale 1903
CH1903+	Système de référence local de la mensuration nationale 1995
CHGEO98R	Modèle de géoïde tramé (raster) 1998 de la Suisse
CHKM95	Modèle cinématique de la mensuration nationale 1995
CHTRF95	Cadre de référence global de la mensuration nationale 1995
CHTRS95	Système de référence global de la mensuration nationale 1995 (adapté à ETRS89)
CIO	Conventional International Origin
CTS	Conventional Terrestrial System
ETRFxx	European Terrestrial Reference Frame (xx est à remplacer par une année, p. ex. ETRF93)
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989
EUREF	European Reference Frame
GPS	Global Positioning System
GRS80	Global Reference System 1980
IERS	International Earth Rotation Service (cf. SIRT)
IGS	International GPS Service (for Geodynamics)
ITRFxx	IERS Terrestrial Reference Frame (xx est à remplacer par une année, p. ex. ITRF96)
ITRS	IERS Terrestrial Reference System
MN03	Cadre de référence de la mensuration nationale 1903
MN95	Cadre de référence local de la mensuration nationale 1995
NF02	Nivellement fédéral 1902
RNA95	Réseau national altimétrique 1995
S/A	Selective Availability (disponibilité sélective)
SIRT	Service international de la rotation terrestre (cf. IERS)
UTM	Universal Transverse Mercator (Projection)
WGS84	World Geodetic System 1984